

# Der Stadtpilot Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring

Dipl.-Ing. Jörn Marten Wille<sup>1</sup>

Dipl.-Inf. Kai Homeier<sup>2</sup>, Dipl.-Ing. Richard Matthaei<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. Tobias Nothdurft<sup>3</sup>, Dipl.-Inf. Sebastian Ohl<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. Andreas Sasse<sup>3</sup>, Dipl.-Ing. Falko Saust<sup>1</sup>

Prof. Peter Hecker<sup>3</sup>, Prof. Markus Maurer<sup>1</sup>, Prof. Walter Schumacher<sup>1</sup>, Prof. Lars Wolf<sup>2</sup>

Technische Universität Braunschweig  
stadtpilot@tu-bs.de  
<http://stadtpilot.tu-bs.de>

<sup>1</sup>Institut für Regelungstechnik, Hans-Sommer-Straße 66, 38106 Braunschweig

<sup>2</sup>Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund, Mühlenpfordtstraße 23, 38106 Braunschweig

<sup>3</sup>Institut für Flugführung, Hermann-Blenk-Straße 27, 38108 Braunschweig

## Kurzfassung

Autonomes Fahren wurde auf Autobahnen seit Anfang der neunziger Jahre in verschiedenen Projekten erforscht. Einen neuen Höhepunkt erreichte die Forschung an autonomen Fahrzeugen durch die DARPA Urban Challenge 2007. Erstmals stellte sich damit die Herausforderung, autonomes Fahren auf eine stadtähnliche Umgebung zu übertragen. Die TU Braunschweig hat erfolgreich mit dem Forschungsfahrzeug Caroline an der DARPA Urban Challenge teilgenommen und qualifizierte sich zusammen mit 11 der ursprünglich 89 Teams für das Finale der Urban Challenge. Die gesammelten Erfahrungen im Bereich des Autonomen Fahrens werden gegenwärtig in einem Folgeprojekt mit dem Namen Stadtpilot vertieft. Ein Zusammenschluss aus drei Fachbereichen der TU hat sich zum Ziel gesetzt, den Braunschweiger Stadtring autonom zu befahren. Im Rahmen dieses Beitrages werden die grundlegenden Szenarien und Inhalte des Projektes dargestellt. Der Beitrag beschreibt die besonderen Herausforderungen des Stadtringszenarios an das System und die einzelnen Module.

## 1 Einleitung

In der DARPA Urban Challenge 2007 hat ein interdisziplinäres Team aus Instituten der Elektrotechnik, Informatik und des Maschinenbaus mit dem Versuchsfahrzeug „Caroline“ gezeigt, dass autonomes Fahren in einer urbanen Umgebung realisierbar ist (Wille und Form, 2008a). Die im Wettbewerb gesammelten Erfahrungen sollen im hier vorgestellten Folgeprojekt mit dem Namen Stadtpilot vertieft werden. Ziel des Projekts ist die vollständig autonome Fahrzeugführung mit einem Straßenfahrzeug auf dem Braunschweiger Stadtring.

Eine Fahrt auf dieser teilweise baulich getrennten, zweispurigen Straße beinhaltet u.a. Spurwechselmanöver, Abbiegevorgänge an Kreuzungen, Einfädeln in den fließenden Verkehr sowie Ein- und Ausparkmanöver.

Das definierte Szenario sieht vor, dass das Fahrzeug in der Hans-Sommer-Straße am Haus der Elektrotechnik auf dem Seitenstreifen startet. Der Testträger soll den Stadtring vollständig autonom befahren und dabei die verschiedenen Verkehrssituationen beherrschen. Abschließend soll das Fahrzeug zum Elektrotechnik-Hochhaus zurückkehren, um eine Parklücke auf dem dortigen Parkplatz zu finden. Abbildung 1 gibt einen Überblick über den geplanten Kurs.

Für das Vorhaben werden zur Zeit zwei neue Fahrzeuge aufgebaut, die nach dem berühmten Braunschweiger Herzog „Heinrich dem Löwen“ (Henry the Lion) benannt sind: Henry und Leonie. Bei den Fahrzeugen handelt es sich um zwei VW Passat Variant, die durch An- und Umbauten an die Erfordernisse einer autonomen Fahrt auf dem Stadtring angepasst werden.

Das Projekt-Team setzt sich aus drei Instituten zusammen: dem Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund, dem Institut für Flugführung und dem Institut für Regelungstechnik. Die Aufgaben der einzelnen Institute werden im nächsten Kapitel beschrieben.

Die Arbeiten für das Projekt finden am neuen Standort des Niedersächsischen Forschungszentrums Fahrzeugtechnik (NFF) am MobileLifeCampus in Wolfsburg statt. Durch die Nutzung der Einrichtungen des NFF erreicht das Projektteam eine engere Zusammenarbeit und eine effektivere Koordination der gemeinsamen Aktivitäten.

## **2 Projektteam**

Die am Projekt Stadtpilot beteiligten Institute werden im Folgenden näher vorgestellt und ihre Rolle im Projekt erläutert.

### **Institut für Regelungstechnik**

Die Schwerpunkte des Instituts für Regelungstechnik (IFR) liegen auf dem Entwurf und Einsatz von Regelungen für mechatronische Systeme, der Erforschung von komplexen innovativen Systemen im Kraftfahrzeug und der Konzeption geeigneter Entwicklungs-, Test- und Diagnosemethoden. Der Fokus ist dabei auf die Bereiche autonomes Fahren, Fahrzeugsystemtechnik, industrielle Antriebstechnik und Robotik ausgerichtet. Neben der

Projektleitung ist das IFR sowohl für die Fahrzeugführung und Regelung als auch für die Umfelderkennung, Datenakquisition und das Sicherheitskonzept verantwortlich.

### **Institut für Flugführung**

Das Institut für Flugführung befasst sich seit zwei Jahrzehnten mit der Entwicklung und dem Einsatz von Präzisionsortungs- und Navigationssystemen auf der Basis von Satellitennavigation sowie mit der Betrachtung von Integritätsfragen. Einen Schwerpunkt bilden hierbei Anwendungen im Luftfahrtbereich, jedoch wurden die Arbeiten im Einsatzbereich für Fahrzeuge im Straßenverkehr aufgrund der hohen Nachfrage erheblich intensiviert.

Das IFF ist neben der zentralen Aufgabe der Ortung des Fahrzeugs für die Erstellung einer digitalen Karte und die Verwaltung der gewonnenen Umgebungsdaten zuständig. Die Entwicklung des HMI ist ein weiteres Arbeitspaket.

### **Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund**

Das Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund (IBR) beschäftigt sich mit Themen wie der Übertragung und Bearbeitung von zeitkritischen Medienströmen, Multimedia-Systemen und -Anwendungen, Kommunikation in drahtlosen Netzen sowie mobiler Anwendungen und der dafür notwendigen Basissoftware.

Das IBR übernimmt die Aufgabe der kreativen Fahrzeugführung in unstrukturierten Gebieten sowie den Bereich der Car-2-Infrastructure-Kommunikation, um zum Beispiel Informationen über aktuelle Ampelzustände zu erhalten.

## **3 Diskussion des Vorhabens**

Das gewählte Szenario unterscheidet sich in den Rahmenbedingungen und Herausforderungen deutlich von der DARPA Urban Challenge 2007, so dass das Leistungsspektrum des neuen Fahrzeugs wesentlich erweitert werden muss. Einige Unterschiede sollen im Folgenden diskutiert werden.

### **3.1 Urbanes Umfeld**

Im Vergleich zur Urban Challenge handelt es sich beim Umfeld des Braunschweiger Stadtrings um eine deutlich dichter besiedelte und stärker bebaute Umgebung, die ein wesentlich höheres Verkehrsaufkommen aufweist. Dazu zählt im Gegensatz zu den DARPA Challenges die Berücksichtigung von Fußgängern und Radfahrern. Zudem unterscheidet sich die Infrastruktur des Stadtverkehrs stark von bisherigen Szenarien. Durch mehrere Fahrspuren

in jeder Fahrtrichtung muss der rückwärtige Verkehr stärker berücksichtigt werden. Ebenso sind an Kreuzungen nicht nur die zusätzlichen Abbiegespuren zu beachten, sondern auch Lichtzeichenanlagen und möglicher Gegenverkehr. Dabei wird die Erfassung der jeweiligen Fahrspuren durch stellenweise fehlende Fahrbahnmarkierungen und oft historisch gewachsene Straßenverläufe, denen kein Klothoiden-Modell zugrunde liegt, zusätzlich erschwert.

Für autonome Fahrzeuge stellt die korrekte Wahrnehmung des eigenen Umfeldes die Basis für sinnvolle Entscheidungen dar. Die gestiegene Komplexität des dicht besiedelten urbanen Umfeldes erhöht den Schwierigkeitsgrad bei der Erfassung des Umfeldes und der Interpretation der Daten.

Darüber hinaus soll der Einsatz des autonomen Fahrzeugs nicht auf einer eigens zu diesem Zweck abgesperrten Strecke stattfinden, sondern im öffentlichen Straßenverkehr. Dies birgt besondere Risiken und stellt erhöhte Anforderungen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Fahrzeugs.

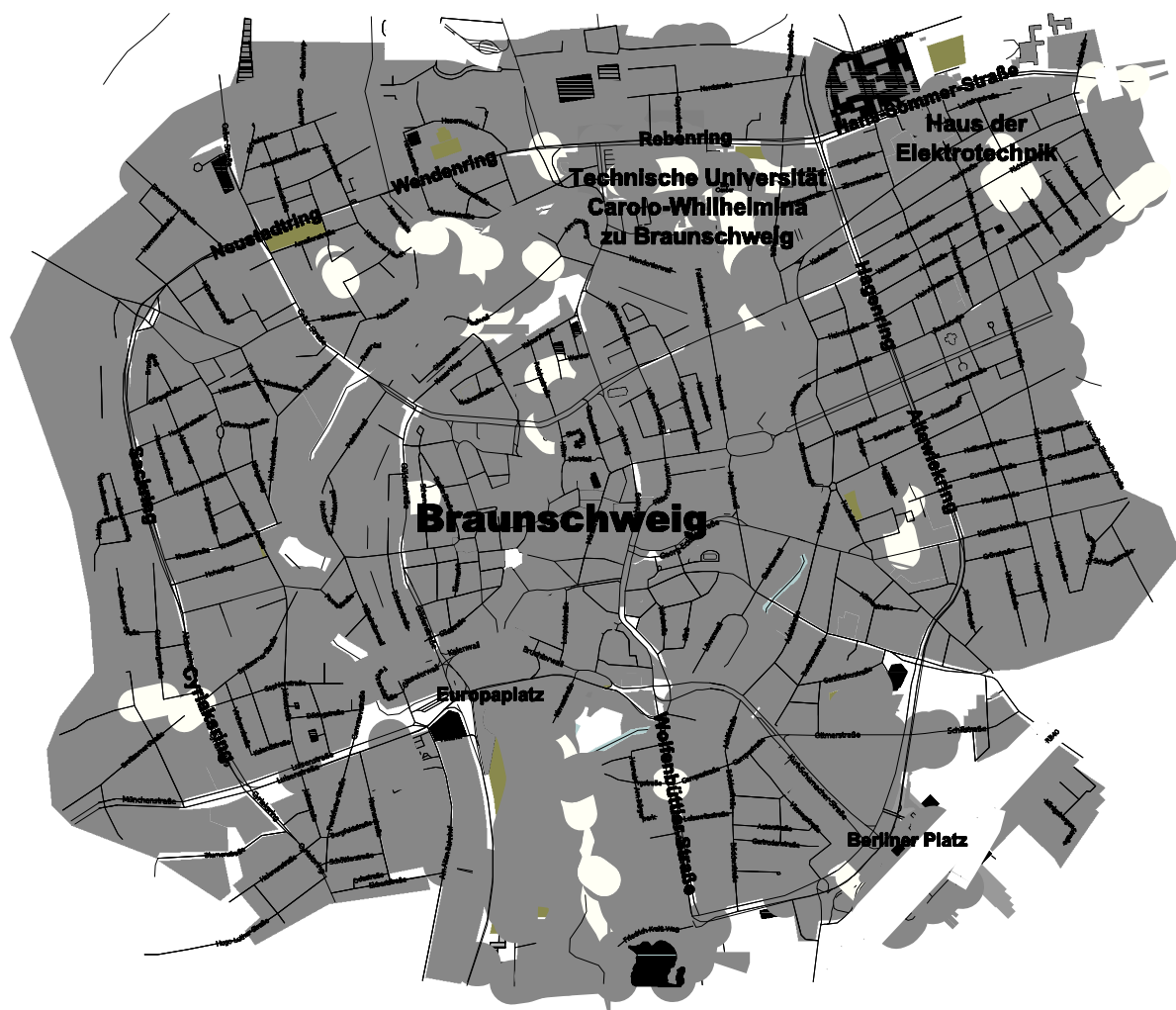


Abbildung 1: Geplante Fahrstrecke für Stadtpilot Szenario



### 3.2 Ausgewählte Situationen des Szenarios

Die Fahrstrecke für die Demonstration der Fähigkeiten der Stadtpilot-Fahrzeuge ist in Abbildung 1 dargestellt. Exemplarisch werden vier typische Situationen des Szenarios näher erläutert.



Abbildung 2: Blick auf den Braunschweiger Stadtring

#### Einfädeln in den fließenden Verkehr

Das Szenario beginnt auf dem Seitenstreifen in der Hans-Sommer-Straße vor dem Hochhaus der Elektrotechnik stadteinwärts, wie es in Abbildung 3 dargestellt ist. Die erste Aufgabe ist damit bereits sehr herausfordernd: Das Einfädeln in den fließenden Verkehr einer zweispurigen Straße, auf der die Geschwindigkeiten der anderen Verkehrsteilnehmer auch deutlich über der gesetzlich zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h liegen können. Es ist somit notwendig, dass die Umfeldwahrnehmung weit nach hinten am eigenen Fahrzeug vorbei die Umwelt modellieren kann. Besondere Herausforderungen stellen schnell herannahende Fahrzeuge, Verkehrsteilnehmer, die kurz vor dem Passieren des Versuchsfahrzeugs von der linken auf die rechte Spur wechseln, sowie die Bewältigung sehr hohen Verkehrsaufkommens dar.

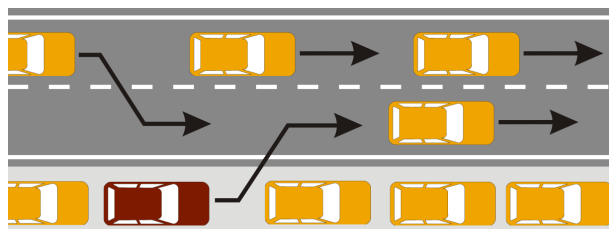


Abbildung 3: Einfädeln in den fließenden Verkehr

## Automatische Spurwechsel

Für eine Umrundung des Stadtringes sind zur Vorbereitung von Abbiegevorgängen sowie in Abhängigkeit von der Verkehrssituation diverse autonome Spurwechsel notwendig. Neben den hohen Anforderungen an die Umfelderkennung verlangt diese Fahraufgabe besondere Fähigkeiten der Situationsanalyse. Im Vergleich beispielsweise zu einem Spurwechselwarner auf Autobahnen sind die Spurzuordnung von Fremdfahrzeugen sowie die Erkennung des Vorhabens der anderen Verkehrsteilnehmer wesentlich komplexer. Weiterhin müssen Spurwechsel an bestimmten Punkten durchgeführt sein, um der geplanten Route an Kreuzungen folgen zu können. Das zum Wechseln der Fahrspur notwendige Auffinden einer entsprechenden Zeitlücke im dichten Verkehr ist besonders herausfordernd.

## Abbiegen an einer vierspurigen Ampelkreuzung

Das Szenario des Stadtringes umfasst mehrere vierspurige Ampelkreuzungen. Teilweise findet das Abbiegen zweispurig mit „grünem Abbiegepfeil“ statt. Meistens gibt es allerdings nur eine Abbiegespur, bei der der entgegenkommende Verkehr Vorfahrt hat. Weiterhin sind die Fahrbahn überquerende Fußgänger und Radfahrer zu berücksichtigen. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die zentralen Beobachtungsbereiche, die bei der Durchführung der Abbiegevorgänge besonders wichtig sind.

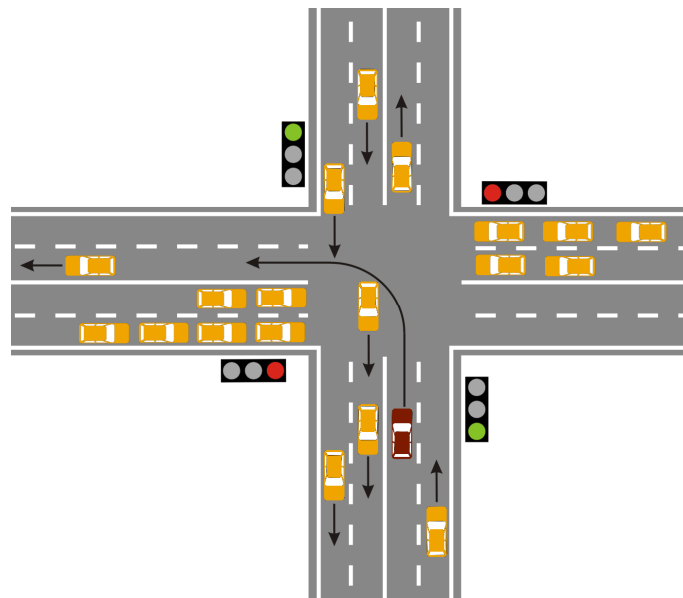


Abbildung 4: Abbiegen an einer vierspurigen Ampelkreuzung

## **Einparken in eine Parklücke**

Die letzte Aufgabe besteht aus einem Einparkvorgang auf dem Parkplatz vor dem Haus der Elektrotechnik. Neben dem eigenständigen Anfahren der Parklücke gilt es, den Status der Parklücke zu erkennen sowie das Einparkmanöver auf relativ engem Raum durchzuführen.

### **3.3 Rechtliche Rahmenbedingungen**

Einer der wichtigsten rechtlichen Aspekte, die einer Klärung bedürfen, ist die Frage, ob eine autonome Fahrt auf dem Braunschweiger Stadtring überhaupt erlaubt wird. Der Artikel 8, Absatz 5 des Wiener Straßenverkehrsübereinkommens (Economic Commission For Europe, 1968) besagt: „every driver shall at all times be able to control his vehicle or to guide his animals.“ Aus diesem Grund sollen alle autonomen Fahrten im öffentlichen Straßenverkehr durch einen Sicherheitsfahrer begleitet werden.

Unsere gegenwärtigen Ansätze diese Frage zu klären, beruhen zum einen auf den Erfahrungen früherer Forschungsvorhaben auf deutschen Autobahnen, wie die autonome Fahrt des Fahrzeugs VaMP, einer Mercedes S-Klasse, von Süddeutschland nach Dänemark (Maurer u.a., 1996). Bereits damals war die vollständig autonome Fahrzeugführung im öffentlichen Straßenverkehr zu Forschungszwecken genehmigt worden.

Zum anderen ist in diesem Zusammenhang nach den Erkenntnissen einiger Forschungsinstitute deutscher Hochschulen, die auch heute die Erlaubnis besitzen, autonome Fahrzeuge auf öffentlichen Straßen zu betreiben, die Wahl des Queraktuators entscheidend. Viele von der Automobilindustrie bereitgestellten Lenkaktuatoren, die eine Schnittstelle für autonome Fahrten bereitstellen, sind von den Herstellern nicht für den öffentlichen Straßenverkehr freigegeben.

Aus sicherheits- und zulassungstechnischen Gründen dürfen die Fahrzeugkonturen nicht verändert werden. Im Vergleich zu Caroline wird daher ein unauffälligeres Sensorkonzept angestrebt. Die Sensoren werden derart in der Fahrzeugverkleidung eingelassen, dass eine möglichst geringe Beeinträchtigung der Sichtbereiche der Sensoren erfolgt. Die zwei stark herausragenden Laserscanner an Carolines Front werden daher bei Leonie unter den Frontscheinwerfern montiert.

Ein sorgfältig ausgearbeitetes Sicherheitskonzept trägt weiterhin dazu bei, die Gefahren der Forschungsfahrten zu minimieren. In Kombination mit dem Sicherheitsfahrer kann so eine hohe Sicherheit gewährleistet werden.

Insgesamt ist das Projektteam zuversichtlich, eine Erlaubnis für die Forschungsfahrten zu bekommen. Eine Garantie gibt es indes aber nicht.

### 3.4 Ampelkreuzungen

Im Unterschied zur Urban Challenge sind alle größeren Kreuzungen auf dem Braunschweiger Stadtring als Ampelkreuzungen ausgeführt. An kleineren Kreuzungen ist sowohl Links- als auch Rechtsabbiegen ohne Ampelanlagen vorgesehen, wobei der Verkehr auf dem Stadtring grundsätzlich vorfahrtsberechtigt ist. In der Urban Challenge waren die Vorfahrtsregeln allein durch das Vorhandensein von Stoppllinien vorgegeben. Während entsprechend der kalifornischen Vorfahrtsregeln an sogenannten Four-Way-Stops alle ankommenden Fahrzeuge halten mussten und zuerst ankommende Autos die Kreuzung vorfahrtsberechtigt überqueren durften, hatte an Two-Way-Stops der Querverkehr Vorfahrt.

Eine Erfassung der Ampelphase soll beim Stadtpiloten vorzugsweise nicht sensorbasiert erfolgen, sondern durch Kommunikation des Fahrzeugs mit einem Server, der die aktuellen Ampelzustände bereitstellt. Ampelzustände umfassen mindestens die Ampelfarbe für jede Spur, erweiterbar um den nächsten Umschaltzeitpunkt sowie ein Kreuzungslayout.

Das Fahrzeug kommuniziert über die vorhandene UMTS-Anbindung mit dem Ampelserver. Gegenwärtig werden Konzepte erarbeitet, wie die Daten der Ampeln aktualisiert werden. Neben den technischen Herausforderungen gilt es hier auch die rechtlichen Rahmenbedingungen zu berücksichtigen, ob ein Zugriff auf die Ampelanlagen möglich ist. Die Kenntnis der Ampelphasen ermöglicht darüber hinaus auch ein optimiertes Anfahren an die Kreuzungen.

### 3.5 Präzision

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zum Urban Challenge Szenario ist die avisierte Durchschnittsgeschwindigkeit auf dem Braunschweiger Stadtring. Das Reglement der DARPA Urban Challenge hatte eine Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h vorgegeben. Allerdings gab es während des Qualifikationsprozesses und dem Finale der Urban Challenge nur wenige Abschnitte auf dem Testparcour, in denen die Fahrzeuge diese Geschwindigkeiten wirklich erreichen konnten. In der Regel wurden niedrigere Geschwindigkeiten gefahren. Selbst die Siegerteams fuhren im Finale nur eine Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 20 km/h.

Das Stadtpilotszenario hingegen fordert eine Einordnung in den fließenden Verkehr, ohne diesen zu behindern. Das bedeutet, dass unter deutlich dynamischeren Bedingungen mit einer höheren Verkehrsdichte eine Geschwindigkeit von bis zu 60 km/h gefahren werden muss, was unter anderem auch zu größeren Abständen zwischen den einzelnen Messupdates aller

Sensoren führt. Diese Umstände führen zu deutlich gestiegenen Anforderungen an die Präzision aller Fahrzeugmodule.

Bezogen auf das Ortungsmodul bedeutet dies, dass durchgängig eine zuverlässige und fahrspurgenaue Positionierung des Fahrzeugs erfolgen muss. Der Begriff der Zuverlässigkeit wird in diesem Zusammenhang durch eine hohe Integrität, Verfügbarkeit und Kontinuität der Ortungslösung definiert. Im Vergleich zum Urban Challenge Szenario beeinträchtigt die starke Bebauung satellitenbasierte Ortungsverfahren, so dass konventionelle Ansätze, wie eine reine GPS/INS Lösung, nicht zielführend sind.

Analoge Genauigkeitsanforderungen gelten auch für die digitale Karte, was insbesondere durch die Integration heterogenen Kartenmaterials aus verschiedenen Projektionen erschwert werden kann. Beispielsweise müssen die dort verzeichneten Fahrspuren auch ohne die Unterstützung der visuellen Fahrspurerkennung in der Lage sein, eine robuste Fahrzeugführung sicherzustellen. Dies ist speziell in Kreuzungsbereichen von großer Bedeutung. Integeres Mapmatching kann nur bei hochgenauer Karte und Ortung durchgeführt werden.

Die deutlich erhöhte Verkehrsdichte stellt insbesondere höhere Anforderungen an die Umfeldsensorik und die Module zur Fahrentscheidung bzw. der Situationsanalyse. So muss die Sensorik in der Lage sein, auch im dichten Verkehr mehrere Verkehrsteilnehmer voneinander zu unterscheiden und sie der korrekten Fahrspur zuzuordnen.

### **3.6 Sicherheit**

Bereits im Abschnitt 3.3 wurde angemerkt, dass die Sicherheit ein zentraler Punkt beim Betrieb eines autonomen Straßenfahrzeugs im öffentlichen Straßenverkehr darstellt. Im Gegensatz zur Urban Challenge besteht das Verkehrsumfeld nicht aus Stuntfahrern. Stattdessen werden sich die Testträger in einem Umfeld mit anderen Verkehrsteilnehmern bewegen, die keine Kenntnis bzw. nur sehr begrenztes Wissen über die autonome Fahrt haben. Daher ist es essentiell, ein Höchstmaß an Sicherheit zu erreichen, so dass im Projekt Stadtpilot verschiedene Maßnahmen verwirklicht werden.

Ein zentraler Punkt stellt das entwicklungsbegleitende Simulations- und Testkonzept dar. Die Herausforderung ist hierbei, den späteren sicheren Betrieb auf öffentlichen Straßen zu gewährleisten. Dazu werden in (Saust u.a., 2009) feste Grundsätze definiert, die sowohl für die einzelnen Komponenten und ihre Bestandteile als auch für das Gesamtsystem erfüllt sein müssen. Das Konzept beinhaltet neben einer manuellen Erzeugung von Testfällen eine automatisierte Evaluierung und Testfallgenerierung, in die insbesondere definierte Gütemaße

und explizit zugelassene Fehlertoleranzen einfließen. Dadurch wird schon in einer sehr frühen Phase die Entwicklung robuster Module gefördert.

Ergänzt wird das Testkonzept durch eine Verkehrssimulation. Aus dem simulierten Verkehrsfluss entstehen dabei kontinuierlich neue Testszenarien. Dadurch kann die Testtiefe nochmals erhöht werden. Vor dem Einsatz des Fahrzeugs im öffentlichen Straßenverkehr erfolgen ausführliche Tests auf nicht öffentlichen Testgeländen. Erst mit einem solchen ausgereiften System kann eine Erprobung unter realen Bedingungen erfolgen.

Ein weiterer zentraler Bestandteil ist das interne Sicherheitskonzept des autonomen Systems. Bereits in Caroline gab es einen sogenannten Watchdog, der Heartbeats von allen Modulen und Sensoren gesammelt hat. Bei Bedarf konnten Softwareprozesse, ganze Rechner oder auch Sensorsteuergeräte neu gestartet werden, was sich in der Urban Challenge als sehr wertvoll erwiesen hat. Beim Stadtpiloten soll dieses Konzept weiter vertieft werden. Neben der eigentlichen Überwachung, ob die einzelnen Systemmodule in Betrieb sind, soll die Güte aller Module überwacht werden. Dazu werden Gütemaße entwickelt, die z.B. Auskunft darüber geben, wie gut die Regelung gegenwärtig arbeitet (Spurtreue, Komfort, etc.). Ferner sollen die Gütemaße durch redundante bzw. korrelierte Informationen plausibilisiert werden. Verlassen die Werte der Gütemaße einen gewünschten Bereich oder erscheinen im Gesamtkontext der Fahrsituation nicht mehr als plausibel, werden entsprechende Maßnahmen ergriffen bzw. dem Sicherheitsfahrer vorgeschlagen. Ziel ist es, dauerhaft die Güte des Gesamtsystems und der Module zu beurteilen, um damit nicht nur auf einen Ausfall zu reagieren, sondern diesem vorzubeugen.

## **4 Erste Umsetzungen**

Zur Darstellung des aktuellen Projektfortschritts werden die Entwicklungsplattform und einige ausgewählte Module vorgestellt.

### **4.1 Fahrzeugträger**

Bereits bei Caroline (Abbildung 5) hat sich der VW Passat Variant als Testträger bewährt. Daher wird auch im Projekt Stadtpilot erneut der VW Passat Variant als Plattform verwendet, um die Erfahrungen aus der Urban Challenge im Bereich des Fahrzeugaufbaus nutzen zu können. Der aktuelle Stand der Montagearbeiten bei der Sensorik ist in Abbildung 6 zu sehen. Die grundlegenden, in die Fahrzeugarchitektur eingreifenden Umbauten zum autonomen Fahrzeug werden erneut durch Volkswagen ermöglicht. Im Vergleich zum Fahrzeug aus der

Urban Challenge ist kein zusätzlicher Linearaktuator für den Gangwahlhebel notwendig, da die Ansteuerung des Getriebes elektronisch möglich ist.



Abbildung 5: Das Urban Challenge-Fahrzeug Caroline



Abbildung 6: Das Stadtpilot-Fahrzeug Leonie

Die Energiebilanz von Caroline hatte während der Urban Challenge häufiger für Probleme gesorgt. Verschiedene Systeme konnten nicht zum Einsatz kommen, da durch eine negative Energiebilanz ansonsten ein Ausfall gedroht hätte. In dem neuen Testträger Leonie wurde ein sehr nachhaltiges Konzept durch eine zweite Lichtmaschine umgesetzt. Beide Generatoren arbeiten im gleichen Stromkreis, so dass die verfügbare Leistung im Vergleich zu Caroline um ca. 1 kW erhöht werden konnte.

#### 4.1.1 Sensorik

Das im Stadtpiloten verwendete Sensorkonzept (Abbildung 7) basiert auf der vorhandenen Sensorik von Caroline. Im vorderen Bereich des Versuchsträgers kommen ein IDIS Laser der Firma Hella, ein Middle-Range-Radar vom Typ UMMR der Firma SMS sowie zwei Alaska

XT Laser der Firma IBEO zum Einsatz. Der hintere Bereich des Fahrzeugs wird durch einen IDIS Laser der Firma Hella, ein Middle-Range-Radar und zwei Blindspot-Radare vom Typ UMMR der Firma SMS sowie einen Lux Laser der Firma IBEO abgedeckt. Ein sehr großer Abdeckungsbereich wird zusätzlich durch einen HDL64-Series 2 Laserscanner der Firma Velodyne erreicht.

Offen ist derzeit die Abdeckung des Nahbereichs an den Fahrzeugseiten. Durch Abschattungseffekte des Dachs und der Kotflügel entsteht hier ein Bereich, der zurzeit nicht überwacht wird. Ziel ist es, das Sensorkonzept im Projektverlauf zu ergänzen und Teile der Sensorik zu ersetzen, um den Anforderungen der Umgebung des Braunschweiger Stadtrings gerecht zu werden.

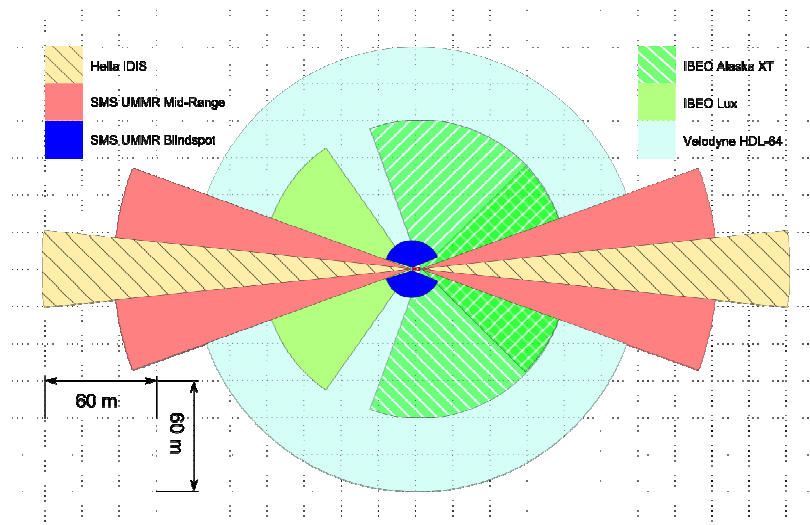


Abbildung 7: Messbereiche der Sensorik im Projekt Stadtpilot

### 4.1.2 Aktorik

Um die autonome Fahrt mit einem Straßenfahrzeug zu ermöglichen, erfolgt ein Zugriff auf Lenkung, Getriebe, Gas- und Bremspedal. Analog zu Caroline erfolgt die Umsetzung der Längsführung über das elektronische Gaspedal sowie über einen Bremsbooster, der einen ausreichend hohen Bremsdruck aufbringen kann. Die Ansteuerung des Direkt-Schalt-Getriebes (DSG) ist über den CAN-Bus möglich.

Da es bei der Auswahl des Lenkaktuators auch rechtliche Rahmenbedingungen zu berücksichtigen gilt, ist hier, wie beschrieben, noch keine Auswahl erfolgt.

### 4.1.3 Rechenhardware

Als Recheneinheit (siehe Abbildung 8) kommen vier Intel Core 2 Quad Systeme mit 2.6 Ghz und jeweils 4 GB Ram zum Einsatz. Im Vergleich zum CarOLO Projekt wurde die Rechenleistung ungefähr verdoppelt und sollte auch für den weiteren Funktionszuwachs genug



Kapazitäten bereitstellen. Die Bauweise der Systeme basiert auf dem PICMG 1.3 Standard, welcher den Einsatz von PCI und PCIx Steckkarten und somit die Verwendung eines breiten Spektrums an Erweiterungskarten ermöglicht. Die Nutzung eines 19"-Racks lässt auf bewährte Technik aus dem Industrie- und Rechenzentrumsbereich zurückgreifen.



Abbildung 8: Rechnerrack im Projekt Stadtpilot

## 4.2 Ausgewählte Module

Ein Einblick in den aktuellen Stand und die weiterführenden Konzepte wird durch die Vorstellung ausgewählter Module gegeben.

### 4.2.1 Softwareframework

Im Rahmen des CarOLO Projekts wurde versucht, möglichst frei verfügbare Opensource-Software einzusetzen. Um den vielfältigen Anforderungen gerecht zu werden, mussten diverse Software-Produkte in ein Gesamtpaket integriert werden. Ein Schwerpunkt lag dabei in der Entwicklung einer Basissoftware zur Abstraktion des Betriebssystems und der Kommunikationsschicht. Im Projekt Stadtpilot wird hauptsächlich kommerziell gepflegte Software eingesetzt, um den Pflegeaufwand gering zu halten.

Das Betriebssystem des Stadtpilot-Projekts basiert auf einem Debian Linux, das zur Verbesserung von Latenzen um die Echtzeiterweiterung "preempt\_rt" ergänzt ist. Die Grundlage für Applikationen im Projekt Stadtpilot bildet das Automotive Data and Timetriggered Framework (ADTF), das bereits zur Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen von Automobilherstellern verwendet wird. Für eine detaillierte Beschreibung wird auf Schabenberger (2007) verwiesen. Die Kommunikation zwischen den verschiedenen Softwaremodulen wird durch nDDS von Realtime Innovations Inc. gewährleistet, welches bereits im Militär- und Luftfahrtbereich weit verbreitet ist.

## 4.2.2 Umfelderkennung

Die Entwicklung der Umfelderkennung erfolgt unter Berücksichtigung einer hohen Wiederverwendbarkeit der Algorithmen. Daher wird bei der Konzeption auf Modularität und eindeutig definierte Schnittstellen geachtet. Das Ziel ist, aufbauend auf den Erfahrungen des CarOLO-Projekts, der Fahrzeugführung je nach Bedarf sowohl Objekthypothesen als auch Gittermodelle der Fahrzeugumgebung zur Verfügung zu stellen. Es müssen folglich Mechanismen entwickelt werden, die beide Darstellungen konsistent halten sowie Objekthypothesen und Punktwolken ineinander umformen können. Mit der Entwicklung dieser Mechanismen ist es außerdem möglich, die auf der Umfelderkennung aufbauende Software von den verwendeten Sensortypen zu entkoppeln und sowohl objekthypothesen- als auch punktwolkenbildende Sensoren einzusetzen. Darüber hinaus sollen zur Überwachung der Qualität der Umfelderkennung Metriken für die Bewertung einzelner Komponenten bestimmt werden, mit deren Hilfe frühzeitig Qualitätsminderungen erkannt und ggf. behoben werden können.

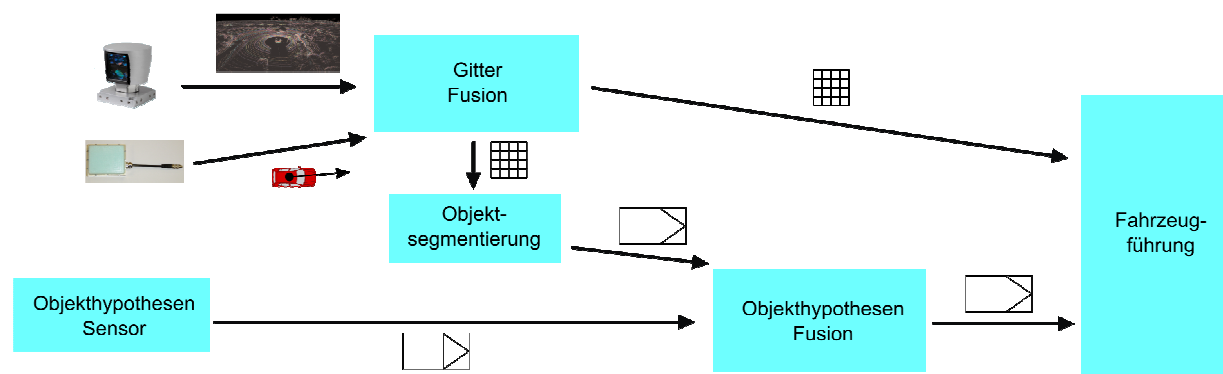


Abbildung 9: Ablauf der Verarbeitung von Punktwolken, Punkt-Objekt-Modell und Box-Objekt-Modell

## 4.2.3 Ortung

Zur Positionsbestimmung des Fahrzeugs wird auch in Leonie vorerst die GPS/INS-Lösung iTraceRT-F200 der Firma iMAR GmbH genutzt, die sich bereits in der Urban Challenge bewährt hat (Nothdurft u.a., 2008). Es wurden jedoch zwei Veränderungen an der bisherigen Hardware-Konfiguration vorgenommen: Zum einen werden die GPS-Korrekturdaten zukünftig nicht mehr via Satellit bezogen. Stattdessen wird auf den HEPS-Dienst von SAPOS zurückgegriffen, dessen Korrekturdaten mittels NTRIP über UMTS bezogen werden. Damit ist kein direkter Sichtkontakt zu einem bestimmten Satelliten notwendig, eine Anforderung, die besonders im Stadtverkehr nur bedingt erfüllbar ist. Zusätzlich kann der

Positionierungsfehler so unter idealen Bedingungen auf wenige Zentimeter minimiert werden. Zum anderen hat sich der Abgriff des Odometriesignals am ABS-Steuergerät als zu fehleranfällig erwiesen, so dass bei Leonie ein zusätzlicher Odometrie-Sensor verbaut wird, der neben der Raddrehzahl auch die Bewegungsrichtung liefert.

Da es sich jedoch bei dem verwendeten GPS/INS-System um eine hochwertige und somit auch sehr kostenintensive Komponente handelt, wird im Rahmen des Projekts angestrebt, durch die Kopplung verschiedener Informationsquellen kostenintensive Komponenten durch günstige ersetzen zu können. Dafür soll die Nutzung serienmäßig verbauter Fahrzeugsensorik angestrebt werden. Der dabei verfolgte Ansatz sieht neben der konventionellen Fusion von Satellitennavigation und Inertial- bzw. Fahrzeugsensoren die zusätzliche Verwendung von Umfelddaten vor, so dass eine robuste Positionierung in den stark strukturierten Umgebungen urbaner Szenarien möglich wird. Somit ist ein umfeldbasierter Ortungsansatz komplementär zu Verfahren der Satellitenortung, da diese durch ihre Umgebungsbedingungen in Form von Abschattung und Mehrwegeempfang zum Teil stark beeinflusst werden. Die Erzeugung redundanter Ortungslösungen bietet zusätzlich die Möglichkeit einer Plausibilisierung und Prüfung der Integrität.

Zur Gewährleistung einer zuverlässigen Initialisierung des Gesamtsystems insbesondere in Standphasen werden die dafür notwendigen Lagewinkel des Fahrzeugs mit Hilfe von GPS-Mehrantennensystemen bestimmt. Dabei sollen GPS low-cost Chipsätze der Firma u-blox zum Einsatz kommen. Ein zentrales Problem bei der Bestimmung der Orientierung sowie der hochgenauen Positionierung mittels GPS ( $< 10$  cm) ist die Berechnung der Mehrdeutigkeiten der Phasenmessung des Trägersignals. Dieser Vorgang kann unter Umständen mehrere Sekunden in Anspruch nehmen und reduziert somit die Verfügbarkeit der Information. Aus diesem Grund werden im Rahmen des Projekts Verfahren zur instantanen Lösung der Mehrdeutigkeiten in urbanen Umgebungen untersucht und entwickelt.

Zur Unterstützung der Arbeiten im Projekt Stadtpilot baut das Institut für Flugführung derzeit ein weiteres Schwesterfahrzeug als generischen Testträger auf, mit dem Entwicklungsarbeiten und Tests in den Bereichen Navigation und Ortung durchgeführt werden.

#### **4.2.4 Umfelddatenbank**

Das erklärte Ziel der Umfelddatenbank ist es, schon bereits bei Fahrtbeginn möglichst umfassende und genaue Vorabinformationen bereitstellen zu können, um so alle anderen Module bei ihrer Arbeit zu unterstützen. Zudem soll in der Umfelddatenbank topologisches

und geographisches Kartenmaterial miteinander verknüpft werden. So wird beispielsweise untersucht, die Lage der Fahrspurmarkierungen in die Karte aufzunehmen, um damit die Fahrspurerkennung vorsteuern zu können. Anschließend kann geprüft werden, in welcher Weise der Umfang und die Güte des a-priori-Wissens optimiert werden können. Die Umfelddatenbank bietet möglichst allgemeine Schnittstellen zur Abfrage der nötigen Informationen für die entsprechenden Softwaremodule an.

Derzeitiges Kartenmaterial für Navigationssysteme von Anbietern wie NAVTEQ oder Tele Atlas ist zu ungenau, unvollständig und unverlässlich, um dieses als a-priori-Wissen für autonome Straßenfahrzeuge einsetzen zu können. Gründe hierfür sind, dass zum Beispiel nur der ungefähre Verlauf der Fahrspurmitte geliefert wird, wodurch Positionsfehler im Straßenverlauf von mehreren Metern auftreten können. Auch die Anzahl der Fahrspuren ist nicht immer verfügbar und es werden keine Daten über die Umgebung angeboten.

Ein möglichst genaues Umgebungswissen ist jedoch für zahlreiche Module erstrebenswert. So kann eine ideale Umfelddatenbank die Ortungsfusion bei der Suche und Identifizierung geeigneter Landmarken unterstützen und der Sensordatenfusion bei der Objektklassifizierung helfen und sie über die aktuellen Sichtbereiche informieren. Weiterhin kann die Umfelddatenbank der Fahrspurerkennung zur Einschränkung des Suchbereichs dienen oder auch redundante Informationen zur Fahrspurerkennung liefern. Aber auch der Fahrentscheider kann bei der Situationserkennung deutlich von einem umfassenden a-priori-Wissen profitieren.

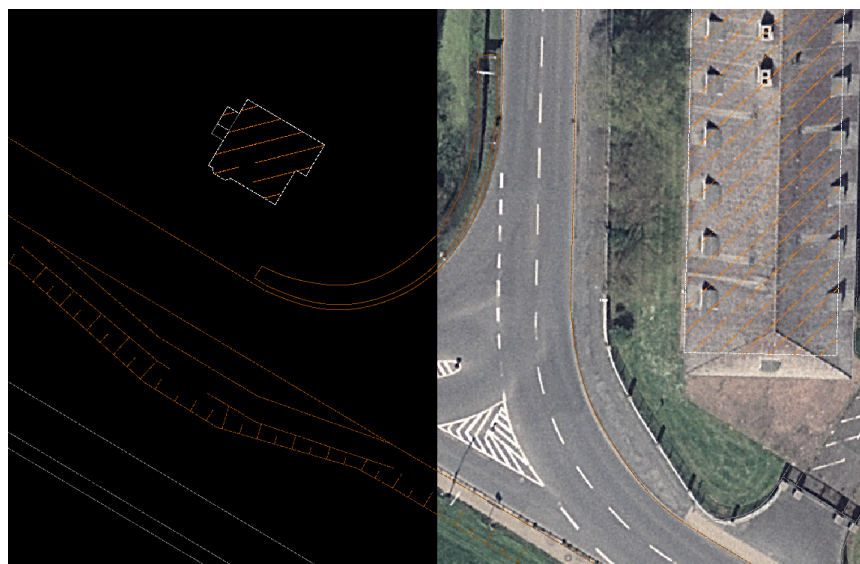


Abbildung 10: Screenshot des CityMappers

Um dieses Ziel zu erreichen, wird als Grundlage in diesem Projekt auf georeferenzierte Luftbilder und Grundrisse der Stadt Braunschweig zurückgegriffen. Die Luftbilder haben eine

Auflösung von 10cm x 10cm pro Pixel. Die Grundrisse sind mit einem Positionierungsfehler von weniger als 10cm behaftet. Werden beide Informationen übereinander gelegt, erhält man das in Abbildung 10 gezeigte Bild. Derzeit werden beide Datensätze von der Stadt Braunschweig noch im Gauß-Krüger-Koordinatensystem geführt. Allerdings ist in naher Zukunft eine Umstellung auf das Universal Transverse Mercator (UTM) Koordinatensystem geplant.

#### 4.2.5 Fahrentscheider

Der in Caroline umgesetzte Fahrentscheider basiert auf dem sogenannte DAMN-Ansatz (Distributed Architecture for Mobile Navigation), der für jede Datenquelle ein sogenanntes Verhalten implementiert. Im Gegensatz zum klassischen DAMN (Rosenblatt, 1997) wurde für Caroline eine um Interrupts erweiterte Variante entwickelt, bei der die Interrupts für Kreuzungen, U-Turns, Parkmanöver und andere Situationen zuständig waren. Während einer autonomen Fahrt wird dabei vom Fahrentscheider überwacht, ob die Bedingungen für die Ausführung eines Interrupts erfüllt sind. Ist dies der Fall, übernimmt der Interrupt die Kontrolle über das Fahrzeug, DAMN pausiert für diesen Moment und führt das Fahrzeug durch die gegenwärtige Situation. Nach erfolgreichem Abhandeln wird die Kontrolle schließlich wieder dem DAMN Modul übergeben. Die Ergänzung von DAMN um Interrupts hat sich als äußerst sinnvoll erwiesen, da somit die Möglichkeit gegeben wurde, Regeln für bestimmte Situationen explizit im System abzubilden. Abbildung 11 verdeutlicht die Funktionsweise.

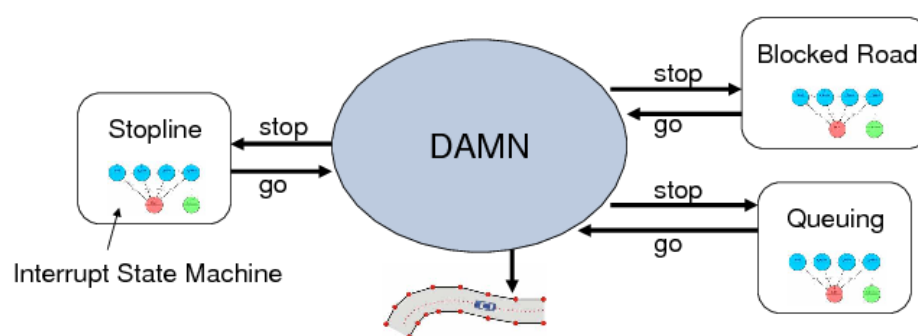


Abbildung 11: Funktionsweise Interrupted DAMN

Der beschriebene Ansatz zeichnet sich durch ein hohes Maß an Kreativität aus, so dass Caroline während der Urban Challenge mitunter als das kreativste Fahrzeug des Teilnehmerfeldes bezeichnet wurde. Beispielsweise verpasste Caroline im finalen Rennen eine



Abbiegung, schaffte es aber dennoch auf einer ihr unbekannten, nicht-kartographierten Straße weiterzufahren, um schließlich die Fahrt auf dem bekannten Straßennetz fortzusetzen (Abbildung 12). Diese Kreativität hatte in unvorhergesehenen Situationen häufig Vorteile, da Caroline meist eine Lösung für die ihr gestellten Aufgaben fand, auch wenn es nicht immer die einfachste Lösung war. Andererseits führte die Kreativität auch zu nicht immer genau vorhersagbarem Verhalten.

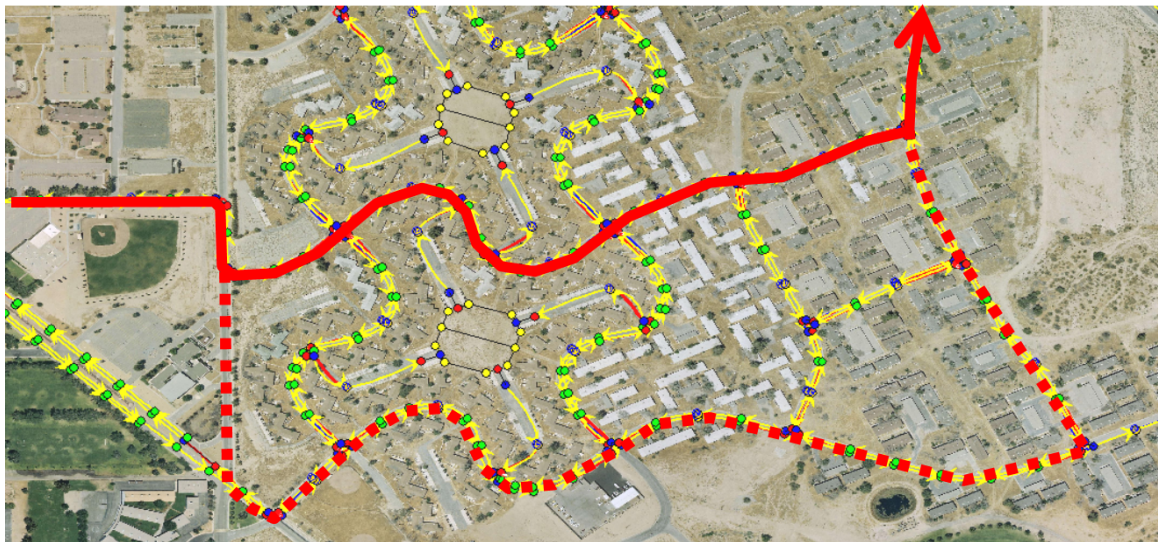


Abbildung 12: Ursprünglich geplante Route (durchgezogene Linie) und tatsächlich gefahrener Weg (gestrichelte Linie)

Die Fahraufgabe im Rahmen des Stadtpilot-Szenarios beinhaltet durch die Fahrt auf dem Braunschweiger Stadtring zunächst eine strukturierte Umgebung, in der ein regelbasierter Ansatz zur Fahrzeugführung ein höheres Maß an Sicherheit und Vorhersagbarkeit bietet. Es darf keinesfalls zu Situationen kommen, in denen sich das Fahrzeug nicht deterministisch verhält. Das abschließende autonome Einparken auf dem Parkplatz vor dem Haus der Elektrotechnik ergänzt das Szenario um eine unstrukturierte Umgebung, die ein gewisses Maß an Kreativität erfordert. Hier kann von den Erfahrungen mit Caroline profitiert werden.

Weiterhin ist es sinnvoll, eine gewisse Kreativität in einer zweiten Intelligenzstufe des Fahrentscheiders für den Stadtring zu verwirklichen. Kommt es beispielsweise auf dem Stadtring zu einer unvorhergesehenen Situation, die durch das regelbasierte Fahrentscheidermodul nicht abgedeckt ist, kann der Fahrentscheider in dieser zweiten Stufe die Situation behandeln. Besonders vielversprechendes Forschungspotential birgt das Zusammenspiel dieser beiden Stufen.

#### 4.2.6 Bahnplanung

Statt der Berechnung einer fahrdynamisch optimierten Trajektorie hat es sich bereits im CarOLO-Projekt als zielführend herausgestellt, dass der Fahrentscheider einen Korridor berechnet, in dem sich das Fahrzeug bewegen darf (Wille und Form, 2008b). Aufgabe der Bahnplanung ist daher, eine auf Fahrdynamik und Komfort optimierte Trajektorie innerhalb dieses Korridors zu bestimmen.

Im Vergleich zu Autobahnen oder den Verhältnissen in der Urban Challenge zeichnet sich der Braunschweiger Stadtring durch schmalere Fahrbahnen und enge Kurvenradien aus, so dass besondere Bedingungen an das Bahnplanungsmodul gestellt werden. In Leonie kommt ein neuartiges analytisches Bahnplanungsverfahren zum Einsatz, das segmentübergreifend krümmungs- und krümmungsänderungsoptimierte Trajektorien berechnet. Ziel ist eine bessere Spurtreue sowie ein erhöhter Fahrkomfort, die in Fahrversuchen bereits bestätigt wurden. Während es in der Urban Challenge ausschließlich darauf ankam, dass das Fahrzeug das Ziel erreichte, soll damit im Projekt Stadtpilot auch ein Mindestmaß an Fahrkomfort erreicht werden.

Die Bahnplanung besteht aus einer a-priori-Planung auf Basis von Kartendaten sowie einer dynamischen Online-Anpassung während der Fahrt. In der a-priori-Planung wird eine über die Gesamtstrecke optimierte Trajektorie anhand des zur Verfügung stehenden Kartenmaterials bestimmt. Die Kenntnis des kompletten Kursverlaufs ermöglicht ein optimales Anfahren der Kurven, so dass Lenkaktivität und Querbeschleunigung reduziert werden können.

In der Online-Anpassung wird die ursprünglich geplante Bahn der Verkehrssituation angepasst, sofern dies notwendig ist. Damit können u.a. Ausweichmanöver in der eigenen Fahrspur sowie Fahrspurwechsel realisiert werden.

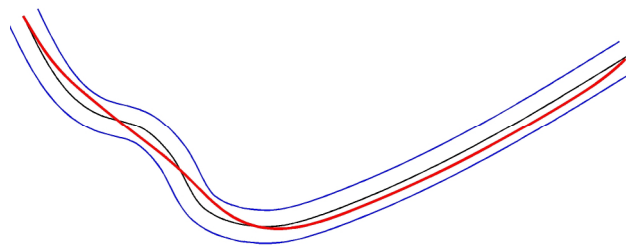


Abbildung 13: Beispiel einer optimierten Bahn

Grundlage beider Module ist ein Optimierungsalgorithmus, der unter Anwendung der Ausgleichsbewegung des Elastischen Bandes sowie dem Einsatz von Smoothing Splines eine fahrdynamisch optimierte Trajektorie innerhalb eines vorgegeben Fahrkorridors bestimmt. Das Ergebnis ist eine segmentübergreifende krümmungsoptimierte Bahn.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das hier vorgestellte Projekt Stadtpilot ist nach der Urban Challenge 2007 der nächste Schritt der TU Braunschweig im Forschungsbereich des Autonomen Fahrens in städtischen Umgebungen. Ein interdisziplinäres Projektteam bestehend aus drei Instituten hat dazu ein Szenario in der Umgebung des Braunschweiger Stadtrings definiert. Während die Urban Challenge noch in einer vereinfachten simulierten Umgebung stattfand, wird mit dem Projekt Stadtpilot die Erforschung der autonomen Fahrzeugführung im realen Stadtverkehr vorangetrieben.

Neben einer ausführlichen Beschreibung des Szenarios wurden die ersten Schritte zur Umsetzung vorgestellt. Im Vordergrund stehen nun die zeitnahe Inbetriebnahme des ersten Testträgers durch Integration der Sensorik und Rechner sowie die weitere Umsetzung der beschriebenen Konzepte. Die ersten Tests auf nicht öffentlichen Straßen werden die Machbarkeit der vorgestellten Ansätze aufzeigen.

Ein sehr wichtiges Vorhaben ist weiterhin die Klärung der rechtlichen Rahmenbedingungen sowie die abschließende Auswahl des Queraktuators. Im weiteren Projektverlauf gilt es ferner, das Sensorkonzept zu verfeinern und zu ergänzen, um den Anforderungen des Braunschweiger Stadtringes gerecht zu werden.

In künftigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen wird das Projektteam die einzelnen Teilmodule des Projekts im Detail erläutern sowie Erfolge und Schwierigkeiten bei der Umsetzung der Projektziele darstellen.

## Literatur

- Economic Commission For Europe 1968** ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE: *Convention on Road Traffic*. Wien: United Nations, 8. November 1968. – URL <http://www.unece.org/trans/conventn/crt1968e.pdf>
- Maurer u.a. 1996** MAURER, M.; BEHRINGER, R.; FÜRST, S.; THOMANEK, F.; DICKMANN, E.D.: A Compact Vision System for Road Vehicle Guidance. In: *IEEE Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition*, 1996, S.313–317
- Nothdurft u.a. 2008** NOTHDURFT, T.; SASSE, A.; HECKER, P.: CarOLO - Navigation und Karte im DARPA Urban Challenge Team der TU Braunschweig. In: *AAET 2008. Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, Februar 2008, S.246–259
- Rosenblatt 1997** ROSENBLATT, J.: *DAMN: A distributed architecture for mobile navigation*, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Dissertation, 1997
- Saust u.a. 2009** SAUST, F.; MÜLLER, T.; WILLE, J.M.; MAURER, M.: Entwicklungsbegleitendes Simulations- und Testkonzept für autonome Fahrzeuge in städtischen Umgebungen. In: *AAET 2009. Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, 2009



- Schabenberger 2007** SCHABENBERGER, R.: ADTF: Engineering-Framework für Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme. In: *13. Internationaler Kongress Elektronik im Kraftfahrzeug*, 2007
- Wille und Form 2008a** WILLE, J.M.; FORM, T.: Realizing Complex Autonomous Driving Maneuvers - The Approach Taken by Team CarOLO at the DARPA Urban Challenge. In: *IEEE Proceedings of the International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2008
- Wille und Form 2008b** WILLE, J.M.; FORM, T.: Low Level Control in a Modular System Architecture for Realizing Precise Driving Maneuvers of the Autonomous Vehicle Caroline. In: *IEEE Proceedings of the 11th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2008, S.705–710